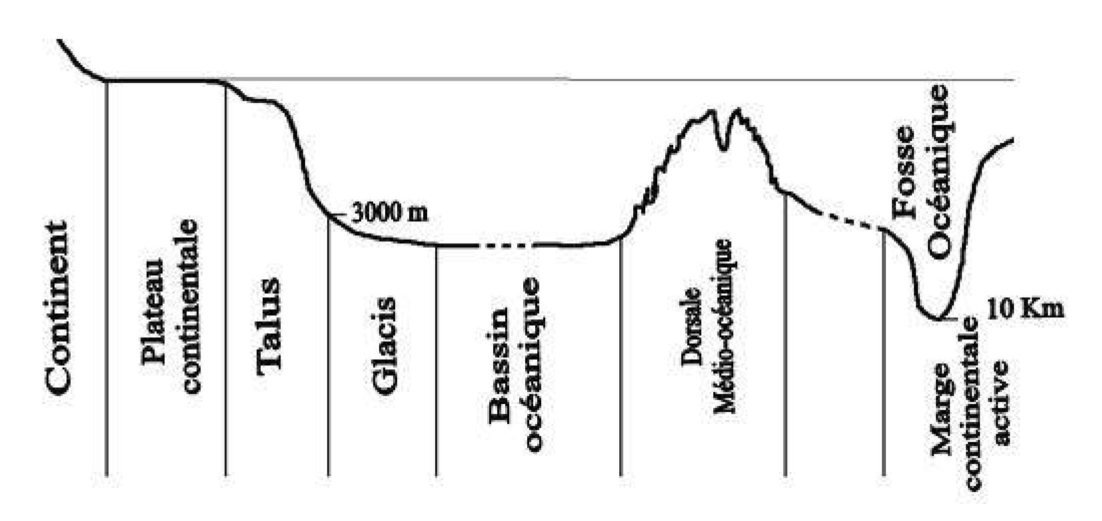
GEODYNAMIQUE INTERNE

I : FORMATION DE LA TERRE

La Terre est un ELLIPSOÏDE DE REVOLUTION aplatie aux pôles à cause de la gravité et de la force centrifuge.

- Rayon équatorial : 6378,1 Km
- Rayon polaire : 6356,7 Km
- Aplatissement : 1/298,3
- Rayon moyen : 6367,4 Km
- Circonférence équatoriale : 40075 Km

GEOÏDE = Surface virtuelle selon laquelle la pesanteur est constante.
Elle est matérialisée par le niveau moyen des mers et qui se prolonge sous les continents.



MORPHOLOGIE DES FONDS DES OCEANS (Marges stable et active)

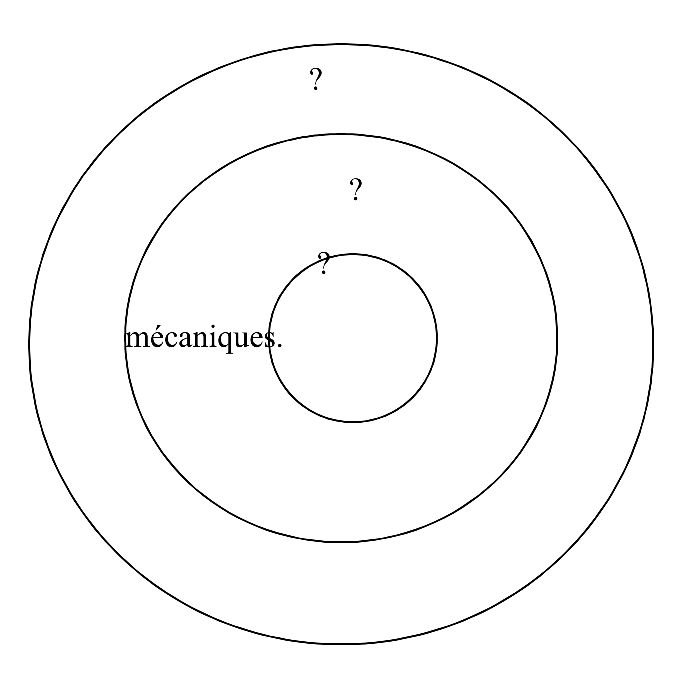
70 % de la surface terrestre est occupée par les domaines océaniques.

		Hydrosphère
		Sédiments
	Socle	
Croûtes	Roches sédimentaire	Roches sédimentaires
	Socle continentale	Socle océanique
?	?	?

LES COMPOSANTES EXTERNES DU GLOBE TERRESTRE

II : LES CARACTERISTIQUE INTERNES DU GLOBE TERRESTRE

Hypothèse : TERRE = Série d'enveloppes internes concentrique.



- Différents composés chimiques.
- Différents minéraux et différentes roches.
- Différentes caractéristiques mécaniques.

1 - Les données de surface

a : Les méthodes de prospection directe

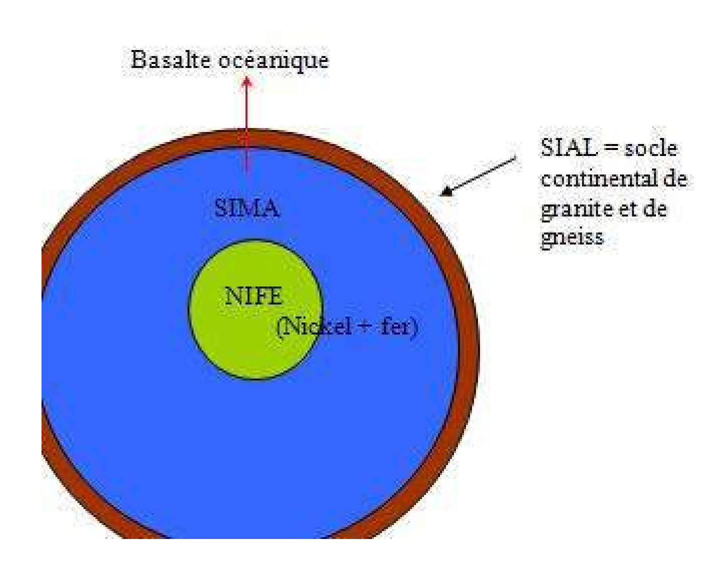
Elles s'appliquent uniquement aux croûtes terrestres océaniques et continentales.

→ SOCLES CONTINENTAUX ET OCEANIQUES :

- Prélèvement
- Analyse chimique
- Analyse minéralogique et pétrographique

b : Les 1ère analyses géochimiques

- Modèle interne :
  Victor Moritz Goldschmidt (1888-1947)
  Front Wigglesworth Clarke (1847-1931)
  Ils ont cassé le socle continental pour faire des analyses chimiques.
  Goldschmidt a appelé le socle continental L'OXYSPHERE.
- Edouard Suess (1831-1914) → Vision plus géologique de la matière. Il donne des noms aux roches. Il propose le premier model d'agencement interne de la croûte terrestre.
-



c : Les connaissances actuelles : socles continentaux et océaniques

SOCLE CONTINENTAL

- Granite : roche magmatique plutonique
- Gneiss : roche métamorphique
- Point commun :
  - Roches ACIDES ($SiO_2 > 65\%$)
  - Minéraux dominants : Feldspaths alcalins, quartz, micas noirs et blancs, amphiboles
  - Densité : 2,7

SOCLE OCEANIQUE

- Basalte : roche magmatique volcanique
- Gabbro : roche magmatique plutonique
- Point commun :
  - Roches BASIQUE (($SiO_2 < 52\%$)
  - Minéraux dominants : Olivine, pyroxène, Feldspaths plagioclases
  - Densité : 2,9

d : Les connaissances actuelles : masse et densité

LOI D'ATTRACTION UNIVERSELLE

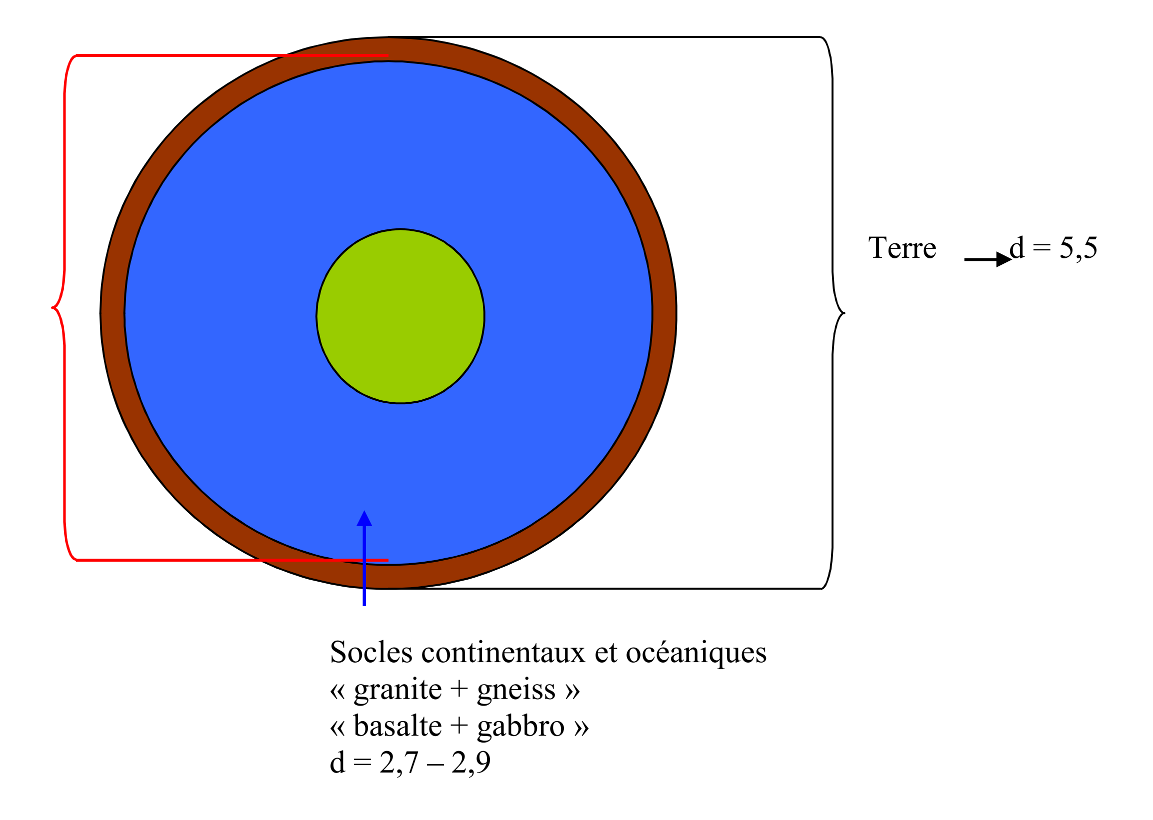
Deux masses m et m2 s'attirent selon la droite qui les joints avec une force (F) proportionnelle au carré de leur distance (d)

$F = G \times (m1 \times m2)/d^2$

Si une masse de 1Kg (m1) est posée sur la surface terrestre (masse de la Terre = M), elle est soumise à une force (son poids) égale, en première approximation, à la force gravitationnelle terrestre.

$F = P = g \times m1 = G \times (m1 \times M)/r^2$ $\longrightarrow$ $M = (g \times r^2)/G$

Masse de la Terre M = 5,96. 10   Kg
Masse volumique de la Terre = 5,517 Kg / dm
Densité moyenne terrestre = 5,517



e : Les connaissances actuelles : Les données thermiques

La température augmente en moyenne de 1°C tous les 30 mètres.

→ Les Gradients géothermiques :

- Il existe dans les enveloppes internes des sources de chaleurs internes.
- L'énergie calorifique se propage et se dissipe vers la surface terrestre.
- Dans le socle océanique le gradient géothermique est plus élevé que dans un socle continental.

f : Les connaissances actuelles : La gravimétrie

La gravimétrie a pour objet l'étude du champ de pesanteur à la surface terrestre et ses variations géographiques.

→ Variation de pesanteur à la surface = f (épaisseur des croûtes)

« A un relief proéminent de la surface terrestre correspond, le plus souvent, en profondeur, un épaississement crustal… »

Cette interprétation s'appuie sur le principe d'ISOSTASIE.

ISOSTASIE : Equilibre entre les diverses masses constituant la croûte terrestre.

Selon le principe d'Isostasie, il existe une SURFACE virtuelle sphérique dite DE COMPENSATION au niveau de laquelle les différentes enveloppes de roches sus-jacentes exercent toujours la même pression et ceci quelles que soient les variations topographiques de surface.

SURFACE DE COMPENSATION : Outil mathématique, référence de mesure fixée sous les croûtes, dans le manteau, à environ 70Km de profondeur.

DIFFERENTS MODELES : Ceux de PRATT et d'AIRY (voir dossier)

- Sous les plaines continentales : Epaisseur moyenne de la croûte continentale = environ 25Km
- Sous les montagnes continentales : Epaisseur moyenne de la croûte continentale = environ 70Km
- Sous les fossés d'effondrements : Epaisseur moyenne de la croûte continentale < 10Km
- Sous les plaines abyssales : Epaisseur moyenne de la croûte océanique = environ 10Km
- Sous les dorsales océaniques : Epaisseur moyenne de la croûte océanique < 10Km
- Sous les marges … c'est plus complexe !

EN RESUME :

Les données actuelles de surface montrent :

1- Que la croûte océanique et la croûte continentale sont différentes.
2- Que ces croûtes ont des épaisseurs variables (mesures gravimétriques et principe d'isostasie)
3- Que des enveloppes internes plus denses existent en profondeur (> 5,5)
4- Que de la chaleur est produite dans les profondeurs de la Terre.

2 - L'échographie sismique de la Terre

a : Les séismes : un outil naturel d'investigation

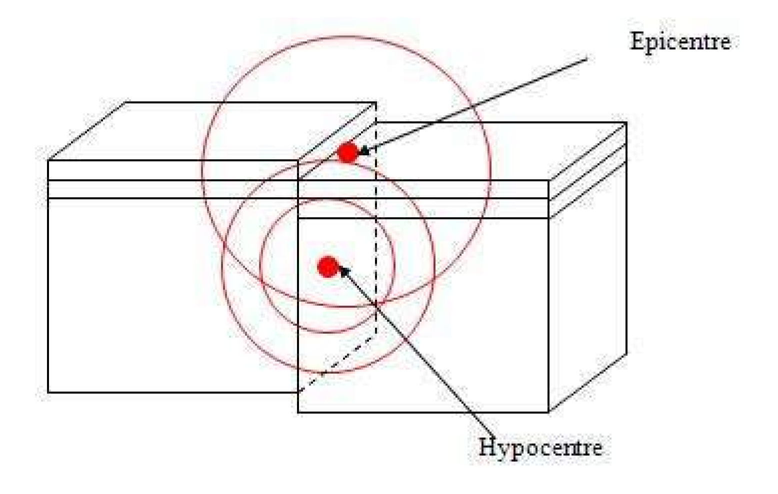
1- Définitions

SEISME : Ebranlement brutal du sol provoqué en profondeur par un mouvement relatif de deux compartiments rocheux profond.

Il en résulte une libération d'énergie qui c'était lentement accumulée. Une large partie de cette énergie est perdue sous forme de chaleur dans une zone appelée foyer initial et une autre partie est véhiculée sous forme d'ondes sismiques.

C'est notamment l'étude de la vitesse de propagation de ces ondes et de leurs directions qui va permettre de comprendre la structure interne de la Terre.

EPICENTRE (foyer virtuel) : le point le plus proche sur la surface terrestre où la secousse est maximale.
HYPOCENTRE (foyer réel) : le point où il y a libération de l'énergie initiale.



3 GRANDS TYPES DE SEISME :

- Superficielle → Foyer réel à moins de 60 km de profondeur
- Intermédiaire → Foyer réel entre 60 et 300 Km de profondeur
- Profond → Foyer réel entre 300 et 700 Km de profondeur

SECOUSSE DE DIVERSE NATURE :

- Horizontale
- Verticale
- Rotatoire …

Lorsque le séisme principal et terminé, il existe par la suite des phénomènes de réplique. Ce sont les failles secondaires.

2- Intensité d'un séisme

FONCTION :
- Des effets ressentis par la population
- Des effets sur les objets
- Des dommages matériels causés sur les bâtiments

ECHELLE D'INTENSITE :
- Echelle Mercalli (1956) à 12 degrés
- Echelle MSK (Medveder, Sponhever, Karnik, 1964) à 12 degrés
- Echelle EMS (European Macrosismie Scale, 1992) à 12 degrés

AVANTAGE DE CETTE ECHELLE :
- Détermination de l'épicentre du séisme
- Détermination des risques et des normes parasismiques

3- La magnitude d'un séisme

Elle décrit la quantité d'énergie brusquement libérée par un séisme.
En 1935, Richter proposa une « échelle ouverte » de magnitude.

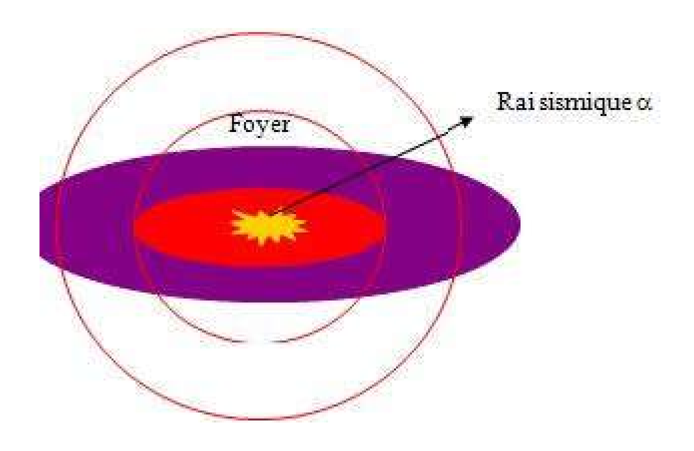
$1,5\ M + a = \log g\ E$

Où M est la magnitude (sans unité) et E est l'énergie libérée par le séisme (en joule)
a est une constante mais qui varie en fonction du séisme.

4- Les ondes sismiques

Un rai sismique est une ligne perpendiculaire à un front d'onde.

Il traduit de la propagation d'une série d'ondes dans une direction donnée.
Dans un milieu homogène, le rai sismique est une droite.
A partir d'un foyer, les rais sismiques sont multiples et leurs directions également.



Front d'onde (= sphère d'énergie)
Lors d'un séisme, une succession de front d'onde est produite au foyer.

- LES ONDES P (Premières)

Ondes longitudinales (ou de compression/dilatation) à cause des quelles les particules sont déplacées dans la direction de la propagation (verticale ou horizontale). C'est également une onde de volume.

- LES ONDES S (Seconde)

Ondes transversales (ou de cisaillement) pour lesquelles les particules sont déplacées dans la direction perpendiculaire à la propagation (verticale ou horizontale). C'est également une onde de volume.

- LES ONDES L (De surface)

  - Les ondes de Love (L) sont des ondes de cisaillement polarisées horizontalement.
  - Les ondes de Rcyleigh (R) induisent un mouvement ellipsoïdal des particules dans le sens rétrograde par rapport à la propagation.

- 2 TYPES DE SISMOGRAPHE

  - Horizontaux (2 placés perpendiculairement l'un à l'autre)
  - Verticaux

5- Vitesse de propagation des ondes

La vitesse varie selon le type d'onde.
Les ondes P sont plus rapides que les ondes S.
Les ondes L sont lentes.

$$Vp/Vs = \sqrt{3}$$

Les ondes P se propagent dans tous les liquides et les solides.
Les ondes S se propagent uniquement dans les solides.
Les ondes L se propagent dans les solides de surface.

VITESSE DES ONDES SISMIQUES P ET S

- Onde P (5,5 → 13,7 Km/s)
  Vp =

- Onde S (3,5 → 7,3 Km/s)

  Vs =

K = module d'incompressibilité (giga pascal)
μ = module de cisaillement (giga pascal)
d = densité
K et μ varient en fonction du matériel traversé.

6- Les ondes sismiques : la direction de propagation des ondes

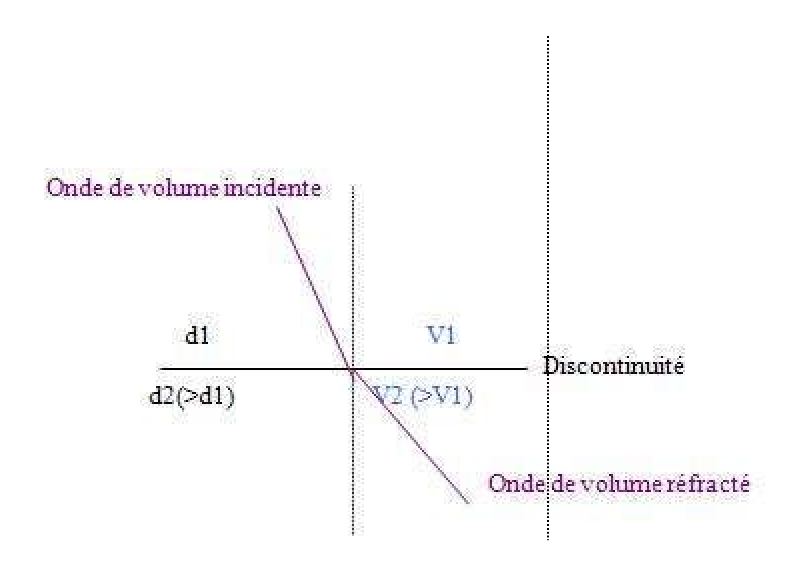
La direction de propagation des ondes de volume (P et S) change en fonction des discontinuités traversées.

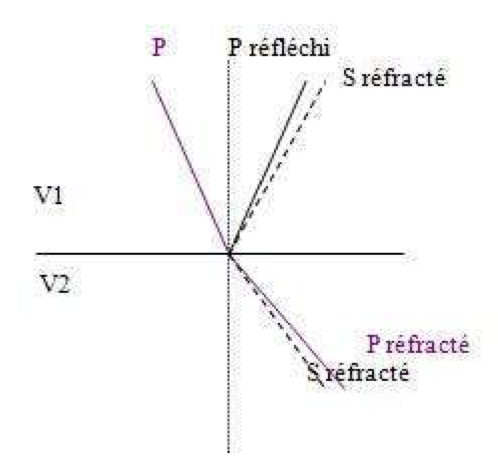
DISCONTINUITE = Surface qui sépare deux milieux aux propriétés physiques différentes.

→ 2 enveloppes rocheuses de densités différentes
→ 2 discontinuités majeures

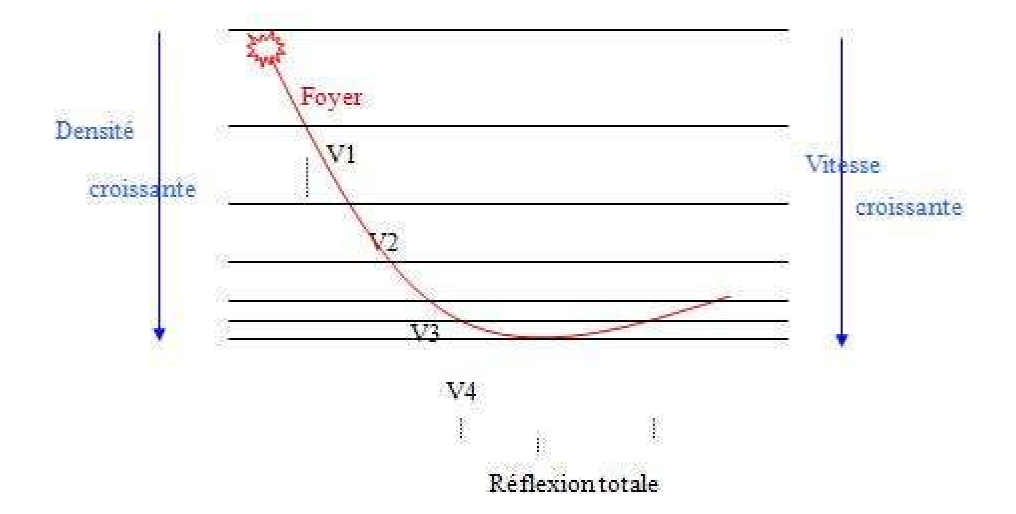
LOI DE DESCARTES :

Sin i / V1 = Sin r / V2 = constante





V1 <V2
i = angle d'incidence
r = angle de réfraction



b : l'échographie de la terre à partir des séismes proches

Andrija Mohorovicie a étudié la propagation des ondes grâce au sismogramme.

1909 : Grand séisme en Croatie. Mohorovicie constate qu'il reçoit deux types d'ondes P : Les ondes classiques (Pg) et des ondes plus précoces (Pn) qui ont du circuler plus vite.

Son hypothèse : Les ondes Pn ont du évoluer à une vitesse bien supérieure à la vitesse de Pg, sûrement dans une discontinuité.

MANTEAU

PERIDOTITE (roche magmatique plutonique)
LHERZOLITE
HARZBURGITE

- Roches ULTRABASIQUE (SiO_2 < 45%)
- Minéraux dominants :
  OLIVINES
  PYROXENES
- Densité : 3,1 → 5,0

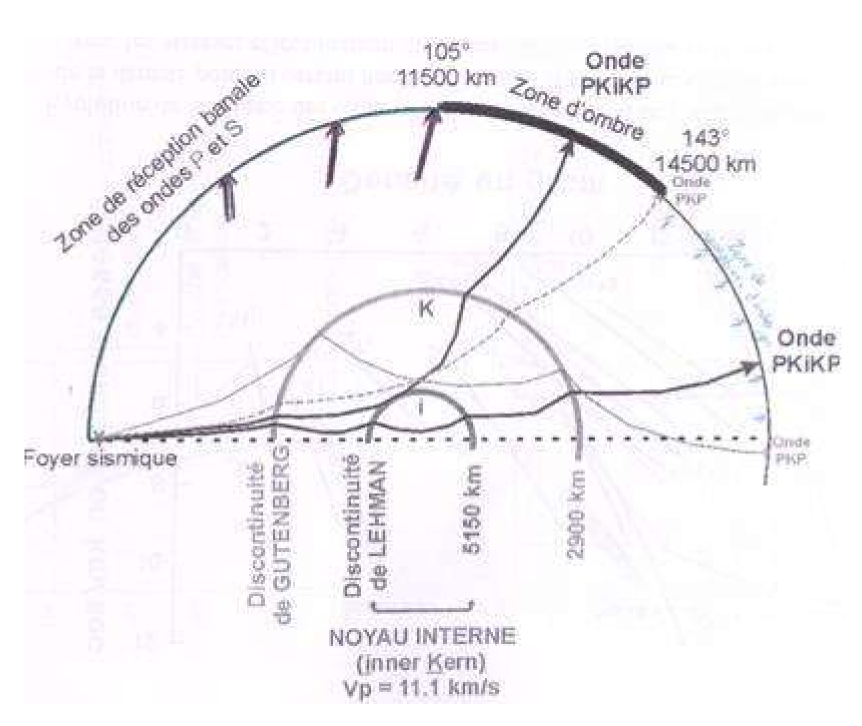
RESUME :

DISCONTINUITE DE MOHO (croûte / manteau)
DISCONTINUITE DE CONRAD (croûte continentale)

DISCONTINUITES
LITHOLOGIQUES / PETROGRAPHIQUES

Roches différentes
Composition chimique
Composition minéralogique
Densité

c : échographie de la terre à partir de séismes lointains



GUTENBERG : Il propose l'existence d'une discontinuité majeure qui se trouvait à 2900 Km de profondeur et séparant le manteau (dans lequel les ondes P et S accélère) du noyau externe. Lorsque l'on atteint cette discontinuité, il y a réfraction des ondes P. Les ondes P ont donc connu deux phénomènes de réfraction. (Voir schéma)

Les ondes S ne traversent pas cette discontinuité. On en déduit donc que le noyau externe est un milieu liquide.

Les ondes ayant subit un phénomène de double réfraction à la discontinuité de Gutenberg sont appelées ondes PkP (K étant le noyau externe).

LEHMANN : En 1936, elle propose l'existence d'une discontinuité plus profonde (5150 Km de profondeur) séparant le noyau externe liquide du noyau interne solide. (voir schéma)
Lorsque les ondes P atteignent cette discontinuité, elles subissent une autre réfraction. Elles sont appelées ondes PkikP (i étant le noyau interne)

APPORTS DE LA SEDIMENTOLOGIE EXPERIMENTALE :

En 1961, Birch montre que :

$Vp = \rho . a + b . M$

Où :
M = Masse atomique moyenne de l'élément métallique étudié.
ρ = Masse volumique du même élément. (variable selon les conditions de pressions expérimentale).

RESUME :

DISCONTINUITE DE GUTENBERG (Manteau / noyau)
Discontinuité chimique et physique (de phase)
PERIDOTITE SOLIDE versus Fe (+ 0 , Ni) Liquide

DISCONTINUITE DE LEHMANN (Noyau interne / externe)
Discontinuité physique (de phase)
Fe (+ O , Ni) LIQUIDE versus Fe (+ O , Ni) SOLIDE

d : L'échographie précise du Manteau (Les zones)

a – La LVZ

« Low Velocity Zone » où les ondes P et S sont ralenties. Aussi appelée Zone de Moindre Vitesse (ZMV)
Manteau fait de PERIDOTITE en FUSION PARTIELLE (mélange solide et liquide)
→ Comportement DUCTILE

RESUME :

LVZ
Enveloppe du manteau en fusion très partielle (1% de fusion partielle)
PERIDOTITE + LIQUIDE MAGMATIQUE
= ASTHENOSPHERE (Très ductile)

b : Zone transitionnelle de manteau (ZT)

ZONE DE TRANSITION avec deux limites où les ondes P et S connaissent une accélération modérée.

→ 400 – 450 Km
→ 650 – 700 Km

ZT (épaisseur 300 Km) = Limite entre le manteau interne et le manteau supérieur.

Changement de structure cristalline de l'OLIVINE des péridotites du manteau.
« OLIVINE » → SPINELLE → PEROVSKITE

RESUME :

2 LIMITES TRANSITIONNELLES
« ZONE DE TRANSITION (400 – 670 Km) »
CHANGEMENT DE STRUCTURE de L'OLIVINE dans la PERIDOTITE DU MANTEAU.

STRUCTURE OLIVINE
STRUCTURE SPINNELLE
STRUCTURE PEROVSKITE

DIVISION DU MANTEAU
Manteau supérieur / Manteau inférieur

c - La mésosphère et la Lithosphère

On peut subdiviser le binôme CROUTE + MANTEAU en 3 ENVELOPPES.

→ CRITERES MECANIQUE :

1 – (ASTHENOSPHERE : ductile) (partie du manteau supérieur)
2 – MESOSPHERE : fragile / ductile (Manteau supérieur + manteau inférieur)
3 – LITHOSPHERE : Fragile (manteau supérieur + croûte)

RESUME :

3 ENVELOPPES AUX XOMPORTEMENTS MECANIQUES DIFFERENTS

« LITHOSPHERE »
Fragile / « sphère rocheuse »
(~120 – 70 Km)

« ASTHENOSPHERE »
Très ductile / « sphère sans résistance »
(~240 Km)

« MESOSPHERE »
Fragile – ductile / « sphère moyenne »
(~2900 Km)

RESUME :

ETUDE DE LA PROPAGATION DES ONDES SISMIQUES ET LES MODELES GEOPHYSIQUES ASSOCIES

DISCONTINUITES PHYSIQUE, LITHOLOGIQUES, CHIMIQUE

FRONTIERES ET ZONES TRANSITIONNELLES

ENVELOPPES AVEC COMPORTEMENTS MECANIQUE DIFFERENTS

« MATERIAUX, LEUR STRUCTURE, LEUR DENSITE »
(2.7/2.9 -- ~16)

(Température ~5000°C – Pression ~4000Kbar)

II : LA DYNAMIQUE DES PLAQUES LITHOSPHERIQUES

1 – Les plaques lithosphériques

a : Définition

(Voir schéma des différentes couches)
LITHOSPHERE = Enveloppe rigide qui repose sur l'asthénosphère.

La limite basale de la LVZ est toujours située entre 230 et 240 Km de profondeur.

L'ASTHENOSPHERE est très ductile.

La LITHOSPHERE est fragmenté. Ce sont des plaques lithosphérique délimités par des frontières de plaques.

Différentes plaques :

- Océaniques = croûte océanique
- Continentales = croûte continentale (très minoritaire)
- Mixte = les deux types de croûte. Zones avec marges passives ou stables. Elles sont en majorités.

PLAQUE LITHOSPHERIQUE : Des portions rigides de la surface terrestre déformables qu'à leurs frontières.

b : Les frontières de plaques

4 GRANDS TYPES :

- Dorsale océanique
- Fosse océanique
- Failles transformantes
- Montagnes

3 TYPES DE MOUVEMENTS :

- Convergence
- Divergence
- Décrochement

LES FRONTIERES SONT DITES :

- En convergence
- En divergence
- En décrochement

On leur associe DES PROCESSUS GEODYNAMIQUE MAJEURS :

- SUBDUCTION
- OBDUCTION
- COLLISION
- ACCRETION
- DECROCHEMENT

DES CONTRAINTES TECTONIQUES INDUITES :
De COMPRESSION
De DISTENSION
De DECROCHEMENT

Le décrochement des plaques est lié aux mouvements de l'asthénosphère.

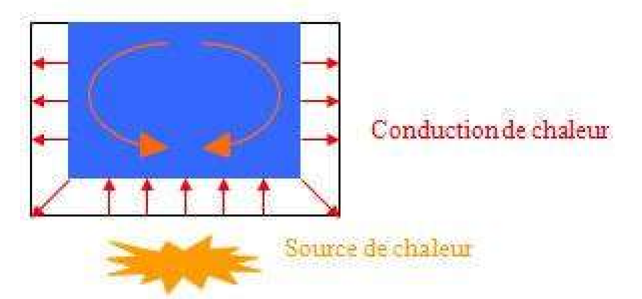

CONVECTION

TRANSFERT VERS LA SURFACE TERRESTRE DES ENERGIES INTERNES

c : Les énergies internes

3 SOURCES :
- Dans les socles crustaux (socles continentaux)
  → Energie liée à la désintégration radioactive des éléments lourds (Uranium, Thurium, Potassium …)
  Ces éléments se retrouvent dans le Feldspath, le Mica, le Zircon…
- Le manteau et le noyau
  → Chaleur résiduelle d'accrétion planétaire
- Le noyau interne
  → Chaleur de cristallisation latente du noyau.

2 TYPES DE TRANSPORT DE LA CHALEUR :
- La CONDUCTION qui est primordiale dans les croûtes
- La CONVECTION qui est importante dans le manteau et notamment l'asthénosphère.



Il existe différents modèles de convection.
Dans le modèle le plus complexe, le noyau externe serait également animé de cellules convectives.

TRANSFERT ET LIBERATION D'ENERGIE INTERNE

REMONTEE DE MATIERE SILICATEE EN FUSION
=
MAGMATISME
(volcanisme + geotherme)

CONTRAINTES TECTONIQUES
=
SEISMES

2 – La tectonique des plaques lithosphériques

TECTONIQUE : (de tektonikos, relatif à la charpente) :

1- Ensemble de déformation ayant affecté des terrains géologiques postérieurement à leur formation.
2- Mécanisme de l'acquisition de ces formations.
3- Leur étude.

La tectonique des plaques

- D'après la théorie de la dérive des continents de Wegener
- D'après la théorie de l'expansion des fonds océaniques de Hess
- D'après les analyses paléomagnétiques de Vine et Matthews.
- D'après l'appellation française de Le Pichon.

La théorie repose sur les 4 propositions suivantes :

- Le découplage mécanique entre la lithosphère et l'asthénosphère.
- La segmentation de la lithosphère en plaques déformables uniquement à leurs frontières.
- La naissance des plaques au niveau des dorsales et leur disparition au niveau des fosses.
- L'existence de mouvements horizontaux et verticaux des plaques du fait des mouvements de convection du manteau et de la subsidence de la lithosphère après refroidissement.

a : Les dorsales : zone d'accrétion et d'expansion.

Remontée de magma mantellique depuis l'asthénosphère par convection (magma issu de la fusion partielle accrue des péridotites)

→ ASCENSION de l'ordre du cm/an

Cristallisation du magma en surface dans l'axe des dorsales et formation des basaltes de surfaces, des gabbros et d'une base de péridotite.

→ ACCRETION de lithosphère océanique.

Déplacements latéraux divergents de la lithosphère en 2 plaques lithosphères océaniques, par convection.

→ EXPANSION de l'ordre du cm/an

RESUME

DORSALE : ZONE D'ACCRETION

CREATION DE CROUTE OCEANIQUE
CREATION DE 2 LITHOSPHERES MIXTES

ENERGIE > CONVECTION > EXPANSION OCEANIQUE

MAGMATISME CALLO-SODIQUE DES DORSALES
(Péridotite, Gabbro et Basalte tholéitique)

SEISMES SUPERFICIELS AXIAUX

HYDROTHERMALISME

b : Les fosses = zone de subduction

Déplacements convergents d'une plaque lithosphérique océaniques vers une plaque lithosphérique continentale / océanique / mixte, par convection

Plongement de la plaque lithosphérique océanique convergente sous l'autre plaque.

- Mouvements convectifs descendants de l'asthénosphère.
- Contraste de densité entre les plaques en convergences.

→ SUBDUCTION de l'ordre du cm/an

Enfoncement dans l'asthénosphère et la mésosphère et « recyclage » progressif.

RESUME

FOSSE = ZONE DE SUBDUCTION

DISPARITION DE CROUTE OCEANIQUE
DISPARITION DE LITHOSPHERE OCEANIQUE

PLONGEMENT PAR CONTRASTE DE DENSITE

MAGMATISME CALLO-SODIQUE, CALLO-ALCALIN, ALCALIN
Gabbro et basalte tholéitique (arc volcanique)
Diorite et Andésite (chaîne de subduction)
Granite et Rhyolite (Chaîne de subduction)

SEISMES SUPERFICIELS DE COMPRESSION
SEISME DU PLAN DE BENIOFF

c : Les failles transformantes : zone de décrochement

Failles transformantes : quelques centaines voir millier de Km de long.
Ce sont généralement des accidents perpendiculaires à la dorsale océanique.

CARACTERISTIQUE DES FAILLES OCEANIQUES :

- Sismique
- Volcanique

En domaine continental, il existe également des failles transformantes (faille de San Andreas)

Ces failles permettent le déplacement des plaques.

d : Certaines montagnes : zone de collision

Convergence de deux plaques lithosphériques continentale à la faveur d'une zone de subduction, après disparition d'une plaque océanique.

- COLLISION entre les deux plaques lithosphériques convergentes de même densité.
- SURRECTION de montagnes jeunes : un orogène.

OBDUCTION : Lambeau de croûte océanique comprimé par un phénomène de subduction inverse.

Les ophiolites traduisent cette obduction.

RESUME

CHAINE DE MONTAGNES : ZONE DE COLLISION

DISPARITION DE CROUTE CONTINENTALE
DISPARITION DE DEUX LITHOSPHERES MIXTES

MAGMATISME ACIDE D'ANTEXIE
Granite

SEISME SUPERFICIELS ET INTERMEDIAIRES DE COLLISION

CONCLUSION FINALE

TERRE

Des enveloppes superficielles et profondes successives

(1) Détectée par les moyens sismiques et gravimétriques
(2) Différentes d'un point de vue physique, chimique et pétrographique
(3) Sources d'énergie (chaleur d'accrétion, de cristallisation, rayonnement
(4) Zone de transfert d'énergie (convection, conduction)

Une surface irrégulière résultant de processus complexe

(1) Dynamique des plaques lithosphériques
(2) Dynamique de surface (érosion, transport, dépôts)